

# 冀北四岔口盆地早期热河生物群的埋藏环境分析

尹永青<sup>1,2</sup>, 赵艳<sup>1\*</sup>, 郭颖<sup>1</sup>, 魏鑫森<sup>1</sup>, 王朝民<sup>3</sup>, 张福成<sup>1</sup>

<sup>1</sup>临沂大学地质与古生物研究所, 山东 临沂

<sup>2</sup>临沂大学生命科学学院, 山东 临沂

<sup>3</sup>丰宁古生物化石博物馆, 河北 承德

收稿日期: 2024年4月17日; 录用日期: 2024年5月19日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

热河生物群(约1.31~1.20亿年前)是世界级化石宝库, 有关其化石大量且精美保存的埋藏机制是古生物研究的重要方向之一。但目前关于早期热河生物群的埋藏环境研究进展与这些古生物的重要性并不相称。河北省丰宁县四岔口盆地花吉营组地层埋藏有大量热河生物群化石, 是早期热河生物群的重要代表地。本文对该地区一处新发现的大型恐龙化石赋存地层的沉积物进行了部分元素(包括Sr, Ba, Rb, Cr, V, Co, Hg和S)分析。元素及其比值组合特征表明该地区存在明显的火山活动, 且该组地层沉积于氧化-弱还原环境多次快速更替的淡水环境。其中, S含量与V/Cr比值显著线性相关( $r = 0.84$ ;  $p < 0.01$ ), 指示可能是频发的火山运动导致古水体弱还原环境的多次出现。与中-晚期热河生物群相比, 早期热河生物群化石埋藏时的气候更加温暖湿润, 埋藏水体也相对富氧。

## 关键词

热河生物群, 四岔口盆地, 早白垩世, 痕量元素, 埋藏学

# Analysis of the Burial Environment of the Early Jehol Biota in the Sichakou Basin, North Hebei Province

Yongqing Yin<sup>1,2</sup>, Yan Zhao<sup>1\*</sup>, Ying Guo<sup>1</sup>, Xinsen Wei<sup>1</sup>, Chaomin Wang<sup>3</sup>, Fucheng Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology and Paleontology, Linyi University, Linyi Shandong

<sup>2</sup>School of Life Sciences, Linyi University, Linyi Shandong

<sup>3</sup>Fengning Museum of Paleontology, Chengde Hebei

Received: Apr. 17<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 19<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

文章引用: 尹永青, 赵艳, 郭颖, 魏鑫森, 王朝民, 张福成. 冀北四岔口盆地早期热河生物群的埋藏环境分析[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(5): 676-685. DOI: 10.12677/ag.2024.145062

## Abstract

The Jehol Biota, which thrived from approximately 131 to 120 million years ago, is a world-class fossil treasure trove, and the burial mechanism of its abundant and exquisitely preserved fossils is one of the important directions in paleontological research. However, progress regarding studying the burial environment of early Jehol Biota has yet to match the significance of these fossils. Many notable fossils of the early Jehol Biota have been unearthed in the Huajiying Strata of the Sichakou Basin, Hebei Province, which is a pivotal site for understanding the early Jehol Biota. In this preliminary study, fossil-bearing sediments were first collected in Youfanggou, where a well-preserved giant dinosaur was recently discovered. Subsequently, elements including Sr, Ba, Rb, Cr, V, Co, Hg, and S were analyzed. The elemental contents and their ratios collectively indicate significant volcanic activity in this area. Additionally, these sediments were deposited in a freshwater environment characterized by rapid alteration between oxidation and weak reduction conditions. Furthermore, sediment S content is significantly linearly correlated with the corresponding V/Cr ratios ( $r = 0.84$ ;  $p < 0.01$ ), suggesting that frequent volcanic activities may have led to the repeated occurrence of weakly reducing environments. Compared to the mid-late Jehol Biota, the climate during the early Jehol Biota fossil burial was warmer and more humid, with relatively oxygen-rich burial water.

## Keywords

Jehol Biota, Sichakou Basin, Early Cretaceous, Trace Element, Taphonomy

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

热河生物群代表白垩纪保存最好的一个陆相生物群，其延续时间约为 1.31~1.20 亿年前，一般指主要分布于河北省北部的花吉营组和辽宁省西部、内蒙古南部的义县组和九佛堂组或相当层位[1] [2] [3]古生物组合。热河生物群产出的数量众多的精美化石几乎囊括所有生物门类，富含大量生命演化的重要信息，例如为研究鸟类起源(包括羽毛、飞行起源起源)、真兽类起源、被子植物起源及昆虫与有花植物的协同演化等重大理论问题提供了极为宝贵的化石依据[2] [4] [5] [6] [7]。

其中，热河生物群如何得以保存和形成化石的埋藏学机制是一个重要的研究方向[3] [8]。已报道的研究指出热河生物群化石主要埋藏于有凝灰质火山岩或凝灰岩夹层的页岩层[9] [10]和富含火山灰的含砾砂岩和凝灰岩[4] [11]。其化石的快速埋藏和精美保存与区域活跃的火山[1] [12] [13]及广泛分布的火山湖[14]有关。这些研究主要集中在产出大量鸟类及带毛恐龙化石的辽西义县组和九佛堂组地层[15] [16] [17]。辽西义县组和九佛堂组的重要古生物的埋藏研究主要集中于早白垩世的中晚期，而关于更早时期的热河生物群的相关研究则鲜有报道，这限制了我们对早期热河生物群所在生态系统的全面认识。

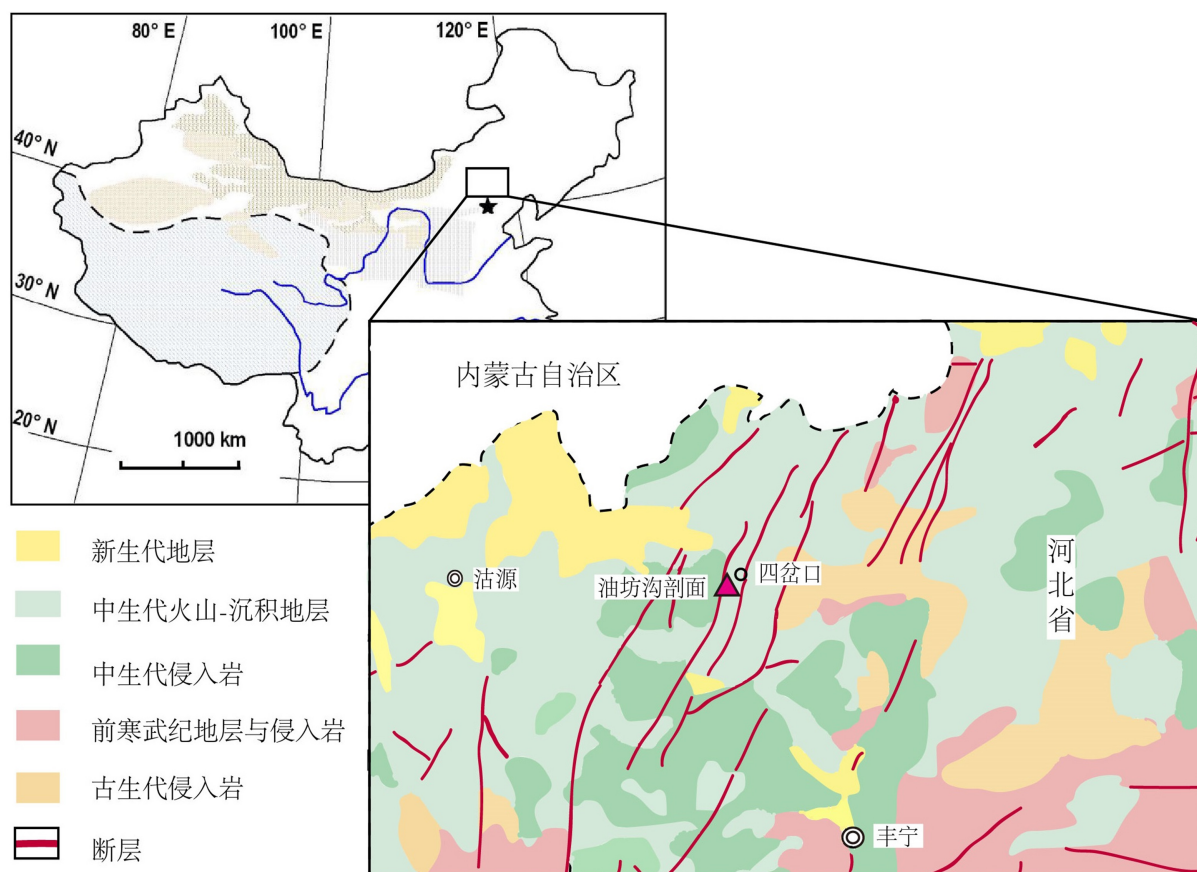
冀北四岔口盆地的花吉营组的热河生物群化石富集地层早于辽西或内蒙南部的相当层位，且埋藏有大量的更早的热河生物群的重要脊椎动物化石，如已报道的丰宁原羽鸟(*Protopteryx fengningensis*)和弥漫始今鸟(*Archaeornithurameemanna*)分别代表中生代反鸟类和今鸟类的最早化石记录[18] [19] [20]、郑氏始孔子鸟(*Eoconfuciusornis zhengi*)是基干鸟类的重要分子[21]。2018 年以来，由临沂大学和河北省、丰宁满

族自治县的各相关部门在该地共同实施了热河生物群化石抢救性发掘项目；期间，除了在该地的油坊沟发掘出一副完整的大型恐龙化石以外，我们还科学采集了其它伴生动物和植物叶化石，以及其它相关标本；这些为我们主要从元素分析角度初步认识早期热河生物群化石的埋藏环境提供了基本的研究材料。

## 2. 研究区概况

四岔口盆地位于燕山北麓自然带，属于温带大陆性季风气候，年均温约为  $0.9^{\circ}\text{C}\sim 6.2^{\circ}\text{C}$ ，年均降水量约  $503\text{ mm}$ ，降水分布特点为东南多西北少。在植被区划上该地属于东北植物区系、华北植物区系和蒙古植被区系交汇地带，以白桦、蒙古栎等的落叶阔叶林为主[22]。构造背景上，四岔口盆地位于燕山褶皱冲断带的北部、东西走向的侏罗纪-白垩纪造山系统的东部段(图 1)[23]。在中生代晚期，燕山褶皱冲断带经历多期褶皱、收缩、伸展和走滑断裂作用，形成广泛分布的陆相沉积、岩浆作用及变形。四岔口盆地是该时期形成的火山-沉积盆地之一。四岔口盆地的晚中生代陆相地层主要由火山岩、火山碎屑岩和沉积岩组成，由下至上分别为张家口组、大北沟组 and 花吉营组[19]。张家口组主要由流纹质熔结凝灰岩、流纹岩和石英粗面岩等火山岩组成；大北沟组主要由砂砾岩和砾岩组成，其上层时覆有湖相粉砂岩；花吉营组以河湖相和湖相粉砂岩为主，并与多层凝灰岩和凝灰质碎屑岩互层[24][25]。

本研究中的早期热河生物群化石埋藏层位位于四岔口盆地的油坊沟剖面下部，属 *Hauterivian* 期的花吉营组地层。SIMS U-Pb 测年结果表明其年代介于  $132.5\sim 130.3\text{ Ma}$  [25]。岩性以河湖相和湖相沉积为主，并有凝灰岩夹层(图 2(a))。

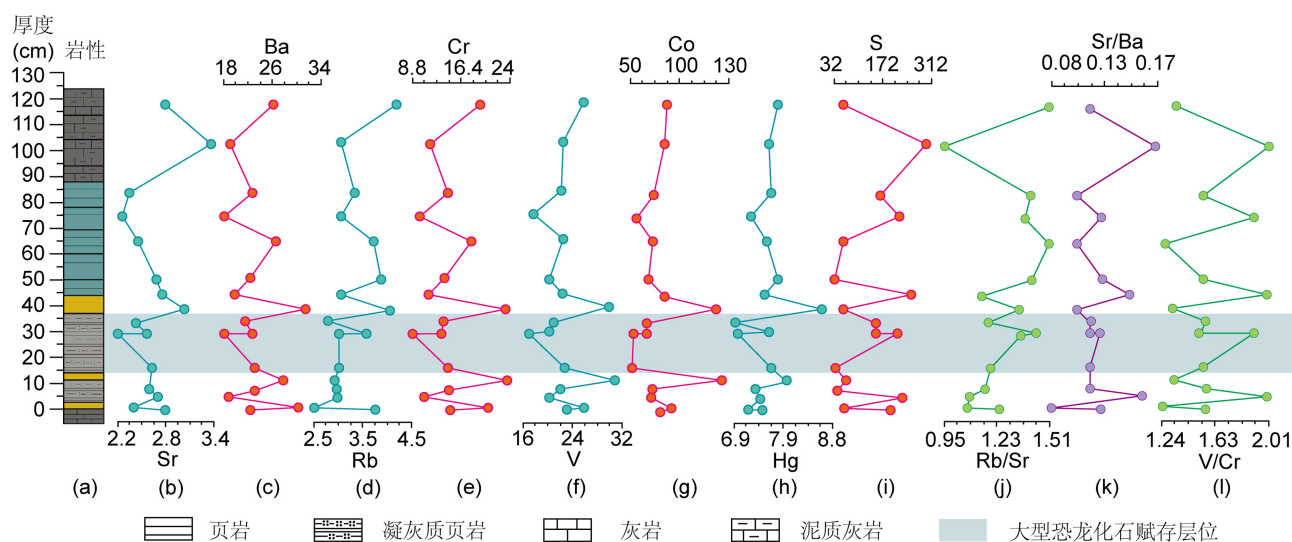


**Figure 1.** Location of the Youfanggou Section, Sichakou Basin, and its geological setting (modified from [26])

**图 1.** 四岔口盆地油坊沟剖面的地理位置及其地质背景(改自[26])

### 3. 材料及方法

野外采样的剖面整体厚约 125 cm, 采集样品共 16 块。其中, 恐龙化石赋存地层位于 14.5~36.5 cm, 厚约 22 cm, 涵盖本次研究的 4 块样品(图 2(a))。在临沂大学地质与古生物研究所实验室, 首先利用玛瑙研钵将 16 块样品研磨至 200 目左右; 然后将样品粉末压平为厚度约 0.5 cm 的饼状, 用手持式 X 射线荧光分析仪(Niton XL3t)对其进行全岩元素特征分析。所测有效元素包括 Sr、Rb、Hg、Co、Cr、V、S、Ba, 均以  $\mu\text{g/g}$  表示。沉积物 Sr/Ba、Rb/Sr、V/Cr 的比值通过相关元素的比值计算得来。



**Figure 2.** Changes of sediment element content ( $\mu\text{g/g}$ ) and ratios in depth, including Sr, Ba, Rb, Cr, V, Co, Hg, S, Rb/Sr, Sr/Ba, and V/Cr  
**图 2.** 沉积物元素 Sr、Ba、Rb、Cr、V、Co、Hg、S 含量( $\mu\text{g/g}$ )和 Rb/Sr、Sr/Ba、V/Cr 随厚度的变化

### 4. 结果

早白垩世冀北四岔口盆地恐龙化石赋存层位所在剖面沉积物的元素组成及含量分析结果(图 2; 表 1)表明:

1) 剖面沉积物的 Rb 分布于 2.53~4.22  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $3.33 \pm 0.48 \mu\text{g/g}$ ; Sr 分布于 2.20~3.36  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $2.64 \pm 0.30 \mu\text{g/g}$ ; Hg 分布于 6.92~8.64  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $7.57 \pm 0.39 \mu\text{g/g}$ ; Co 分布于 50.86~142.37  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $79.51 \pm 25.92 \mu\text{g/g}$ ; Cr 分布于 8.81~23.75  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $14.96 \pm 4.70 \mu\text{g/g}$ ; V 分布于 16.92~31.07  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $22.87 \pm 3.81 \mu\text{g/g}$ ; S 分布于 32.51~295.25  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $135.69 \pm 88.24 \mu\text{g/g}$ ; Ba 分布于 18.28~31.97  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $23.45 \pm 4.20 \mu\text{g/g}$ 。其中, 厚度 15~37 cm 化石赋存层位所在剖面沉积物的 Sr 分布于 2.2~2.65  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $2.47 \pm 0.21 \mu\text{g/g}$ ; Rb 分布于 2.77~3.74  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $3.17 \pm 0.41 \mu\text{g/g}$ ; Hg 分布于 6.92~7.67  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $7.32 \pm 0.39 \mu\text{g/g}$ ; Co 分布于 50.86~64.86  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $57.86 \pm 7.80 \mu\text{g/g}$ ; Cr 分布于 8.81~14.51  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $12.56 \pm 2.55 \mu\text{g/g}$ ; V 分布于 16.92~22.74  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $20.32 \pm 2.46 \mu\text{g/g}$ ; S 分布于 32.51~215.88  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $142.94 \pm 77.95 \mu\text{g/g}$ ; Ba 分布于 18.28~31.97  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为  $21.53 \pm 2.25 \mu\text{g/g}$ 。整体而言, Sr、Rb、Hg 和 S 含量随着厚度增加呈现略微增加趋势; Cr 和 Ba 含量随着厚度增加呈现略微减少趋势; V 和 Co 含量随着厚度增加变化趋势较小。

2) 剖面沉积物的 Rb/Sr 比值分布于 0.95~1.51, 平均值为  $1.27 \pm 0.17$ ; Sr/Ba 比值分布于 0.08~0.17, 平均值为  $0.12 \pm 0.02$ ; V/Cr 比值分布于 1.26~2.01, 平均值为  $1.60 \pm 0.28$ 。其中, 厚度 15~37 cm 化石赋存层位所在剖面沉积物的 Rb/Sr 比值分布于 1.15~1.43, 平均值为  $1.28 \pm 0.13$ ; Sr/Ba 比值分布于 0.11~0.12,

平均值为  $0.11 \pm 0.01$ ；V/Cr 比值分布于 1.52~1.92，平均值为  $1.65 \pm 0.18$ 。整体而言，Rb/Sr、Sr/Ba 比值，随着厚度增加呈现略微增加趋势；V/Cr 比值，随着厚度增加变化趋势较小。

3) 将厚度 15~37 cm 化石赋存层位所在剖面沉积物与厚度 0~15 cm 剖面沉积物进行差异性 (Kruskal-Wallis) 分析，结果表明两组地层间沉积物的 Rb、Sr、Hg、Cr、V、S 和 Ba 含量不存在显著差异，Co 存在显著差异；厚度 15~37 cm 化石赋存层位的沉积物与厚度 37~125 cm 沉积物的 Rb、Sr、Hg、Cr、V、S 和 Ba 含量不存在显著差异，Co 存在显著差异；剖面 0~15 cm 厚度的沉积物与 37~125 cm 厚度的 Sr、Hg、Cr、Co、V、S 和 Ba 含量不存在显著差异，Rb 存在显著差异。

**Table 1.** Trace element contents and their ratios of sediment from the dinosaur fossil-bearing strata, Youfanggou Section  
**表 1.** 油房沟剖面恐龙化石赋存地层的沉积物痕量元素含量及对应比值

厚度 (cm)	Sr ( $\mu\text{g/g}$ )	Rb ( $\mu\text{g/g}$ )	Hg ( $\mu\text{g/g}$ )	Co ( $\mu\text{g/g}$ )	Cr ( $\mu\text{g/g}$ )	V ( $\mu\text{g/g}$ )	S ( $\mu\text{g/g}$ )	Ba ( $\mu\text{g/g}$ )	Rb/Sr	Sr/Ba	V/Cr
0	2.80	3.57	7.45	80.37	14.88	23.52	181.37	22.78	1.28	0.12	1.58
1.00	2.42	2.53	7.29	95.09	21.30	26.39	62.07	31.77	1.05	0.08	1.24
5.00	2.78	2.98	7.44	70.43	10.17	20.41	236.31	19.08	1.07	0.15	2.01
8.00	2.57	2.97	7.36	70.89	14.39	22.76	34.76	23.00	1.16	0.11	1.58
12.50	-	2.94	8.08	142.37	23.75	31.07	61.48	27.67	-	-	1.31
17.00	2.65	3.16	7.67	50.86	14.51	22.74	32.51	23.12	1.19	0.11	1.57
30.00	2.20	3.00	7.05	51.37	8.81	16.92	215.88	18.28	1.36	0.12	1.92
30.00	2.61	3.74	7.62	64.86	13.40	20.40	159.38	22.94	1.43	0.11	1.52
34.00	2.40	2.77	6.92	64.36	13.50	21.20	163.97	21.76	1.15	0.11	1.57
39.50	3.04	4.09	8.64	138.51	23.69	30.46	64.87	31.97	1.35	0.10	1.29
45.00	2.75	3.09	7.59	83.48	11.01	22.05	261.81	19.58	1.12	0.14	2.00
51.50	2.70	3.82	7.76	66.53	13.14	20.14	37.58	22.65	1.41	0.12	1.53
66.00	2.47	3.73	7.59	69.80	17.81	22.37	65.74	26.51	1.51	0.09	1.26
76.00	2.25	3.10	7.21	57.27	9.29	17.91	212.32	18.56	1.38	0.12	1.93
85.00	2.38	3.37	7.63	74.90	14.43	22.28	159.72	23.10	1.42	0.10	1.54
104.00	3.36	3.18	7.59	84.92	11.02	22.12	295.25	19.48	0.95	0.17	2.01
119.50	2.79	4.22	7.77	85.74	19.28	26.05	61.67	26.37	1.51	0.11	1.35

## 5. 讨论

### 5.1. 四岔口盆地花吉营组的沉积环境

埋藏化石的古水体条件，如盐度和氧化还原环境是影响其保存状况的重要因素[1] [27]。湖泊沉积物中微量元素 Sr、Ni 和 Ga 等对沉积水体的盐度条件十分敏感，常被用于区分沉积水体盐度。其中，当沉积岩中 Sr 含量高于  $800 \mu\text{g/g}$  时，指示其沉积于咸水环境；当 Sr 含量低于  $90 \mu\text{g/g}$  时，指示为淡水环境[28] [29]。四岔口盆地花吉营组地层的 Sr 含量分布于  $2.2\sim 3.36 \mu\text{g/g}$  之间(图 2(b))，指示其沉积水体为淡水。另外，湖泊沉积物的 Sr/Ba 比值也是判定古水体盐度的灵敏指标。Sr 和 Ba 在不同水体中的迁移能力存在差异。在淡水中，Sr 和 Ba 均以重碳酸盐的形式溶于水，不易发生沉淀；当水体盐度增加时，Sr 和 Ba 迁移能力的差异导致 Ba 先于 Sr 转换为  $\text{BaSO}_4$  或  $\text{BaCO}_3$  沉淀出来[30]。一般认为，Sr/Ba 比值大于 1.0 为



海相咸水, 小于 0.6 为陆相淡水, 介于 0.6~1.0 之间为半咸水相[31] [32]。四岔口盆地花吉营组地层的 Sr/Ba 分布于 0.08~0.17 (图 2(k)), 同样指示其沉积于淡水环境。

不同的微量元素在不同的氧化 - 还原区间存在差异表现, 因此可利用沉积物中相关微量元素的差异有效区分沉积环境的氧化还原程度。例如, V 和 Cr 在氧化环境中溶于水, 在还原环境中以硝酸盐的形式发生沉淀并在沉积物中富集; V 和 Cr 在还原环境中发生反硝化现象, 但由于两者的反硝化界线存在差异, Cr 会在厌氧条件下更早的发生反硝化还原[33]。基于两种元素还原界线的差异性, 当 V/Cr 比值低于 2 时, 反映水体为氧化环境; 当 V/Cr 比值高于 2 时, 反映水体为贫氧或缺氧的状态[34]。四岔口盆地花吉营组地层的 V/Cr 值介于 1.26~2.01 之间, 且存在多次短期的大幅度比值波动, 每次 V/Cr 比值波动的最大值在 2 附近(图 2(l)), 指示其埋藏的水体在氧化 - 贫氧的弱还原环境间多次波动。大型恐龙化石赋存层位的 V/Cr 比值明显偏大, 表明其处于贫氧的弱还原沉积环境。

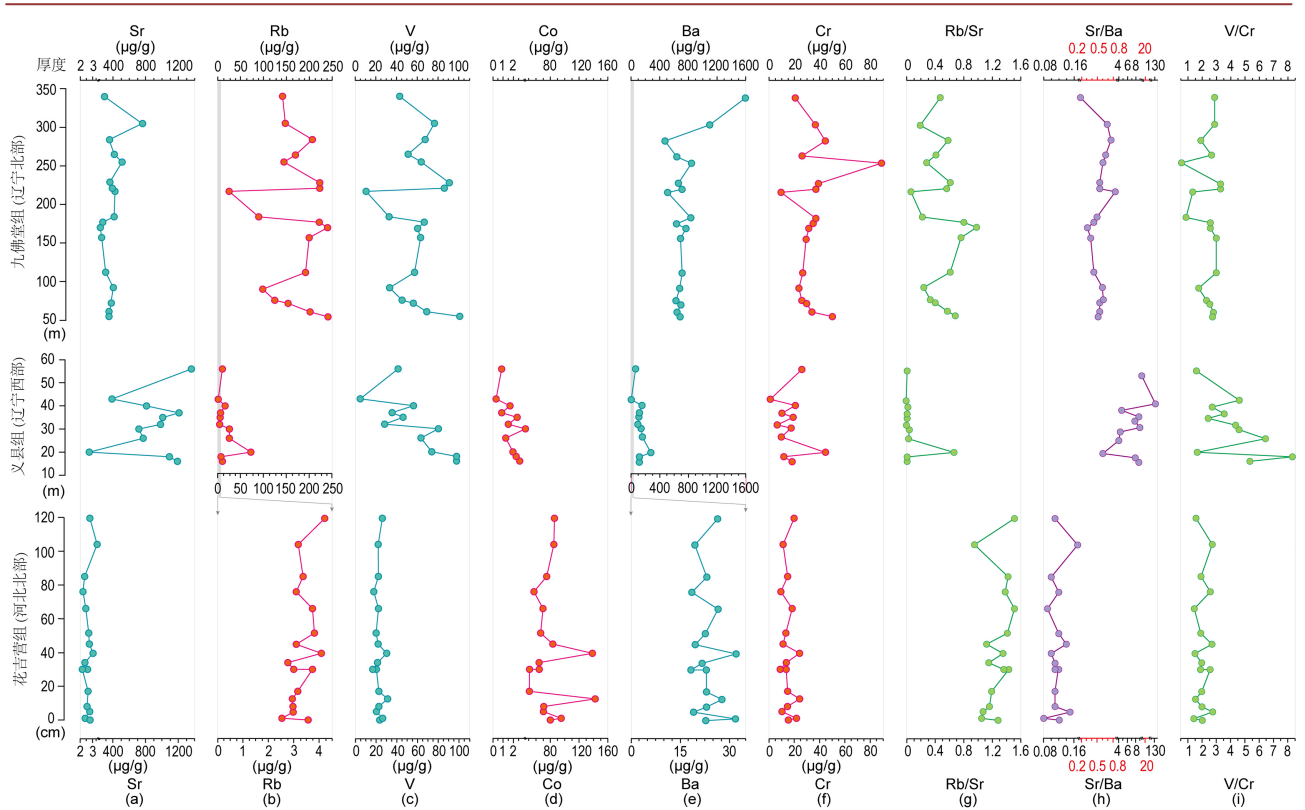
四岔口盆地的花吉营组的元素 Sr、Sr/Ba 和 V/Cr 组合特征表明其地层沉积于淡水环境中, 且沉积过程中水体处于多次且快速的富氧的氧化环境 - 贫氧的弱还原环境的波动状态。此外, 四岔口盆地花吉营组地层的 Hg、S 含量(图 2(h)、图 2 (i))明显高于中国东北地区的前白垩纪沉积岩背景值(Hg: 5.35  $\mu\text{g/g}$ ; S: 6.75  $\mu\text{g/g}$ ) [35], 表明该时期存在显著的火山活动。其中, S 元素含量与 V/Cr 显著线性相关( $r = 0.842$ ;  $p < 0.01$ ), 表明该处古水体的氧化还原程度可能与火山活动有关。火山喷发产生的大量碎屑物质漂浮于湖泊水面, 阻碍了湖水与大气的氧气交换, 使原本开阔的富氧的淡水环境变成贫氧的弱还原环境。水体多次且快速的氧化环境 - 弱还原环境的波动状态表明该地区发生多次火山活动。

## 5.2. 早期热河生物群与中 - 晚期的埋藏环境对比

辽宁西部的义县组及辽宁北部的九佛堂组地层埋藏有典型的中 - 晚期热河生物群, 已有研究指示其所处环境包含高山、森林、湖泊等[1] [11], 整体是较为寒冷的温带气候, 平均气温约  $10 \pm 4^\circ\text{C}$  ( $\sim 42^\circ\text{N}$ ) [36]。基于以下河北北部花吉营组地层的元素 Sr、Rb/Sr 和 Sr/Ba 等组合特征, 早期热河生物群比中 - 晚期热河生物群埋藏初期的气候条件更加温暖湿润(图 3; 表 2)。

沉积物 Rb/Sr 比值由于 Rb 和 Sr 对风化效应的差异响应, 能有效反映气候的干湿条件。Rb 在风化作用中相对稳定, 而 Sr 易发生淋溶丢失[38]。因此, 当气候温暖湿润时, 降水丰沛, 风化较强烈, Sr 元素淋失增多, 导致沉积物中 Sr 含量较低、Rb/Sr 比值增高; 当气候干旱时, 降水少、风化强度低, Sr 淋失量降低, 进而沉积物中 Sr 含量增加, 进而 Rb/Sr 比值降低[39]。四岔口盆地的花吉营组地层 Sr 含量显著低于辽宁西部的义县组和北部的九佛堂组(图 3(a)), 其 Rb/Sr 比值也显著高于另外两组地层(图 3(g)), 说明早期热河生物群埋藏初期的气候环境比中 - 晚期更温暖湿润。花吉营组的喜湿型元素 Co [40] 含量显著高于义县组(图 3(d)), 也支持早期热河生物群更湿润的气候环境。花吉营组地层的 Sr/Ba 比值显著低于辽宁西部的义县组和辽宁北部的九佛堂组(图 3(h)), 指示早期热河生物群埋藏的水体盐度显著低于中 - 晚期, 这也在一定程度上支持早期阶段具有更湿润的气候。此外, 花吉营组地层的 V/Cr 比值低于但更接近九佛堂组地层、显著低于义县组地层(图 3(i)), 说明中 - 晚期热河生物群化石的埋藏水体的更加贫氧。

整体而言, 沉积物的 Rb/Sr 比值在花吉营组地层最高、义县组最低, 九佛堂组的 Rb/Sr 比值介于两组地层之间; 与之相反, Sr/Ba 和 V/Cr 比值在花吉营组地层最低、义县组最高, 九佛堂组的介于两组地层之间。这表明热河生物群早期的气候环境温暖湿润, 埋藏于氧化环境 - 弱还原环境多次快速波动的淡水环境; 演化至中期气候变得干旱, 埋藏介质也变成还原环境的咸水[29]或淡水[15]; 晚期时气候略微好转但仍干旱, 埋藏环境为弱还原环境的淡水开放湖泊[37]。热河生物群不同演化时期呈现的古温度变化也与深海氧同位素曲线指示的全球变化背景[41]相符。



**Figure 3.** Comparison of the taphonomic environment between early and mid-late Jehol Biota (Data of Jiufotang Formation are from Xiushui Basin, North Liaoning Province [37], these of Yixian Formation are from Yixian Basin, West Liaoning Province [29], these of Huajiying Formation are from Sichakou Basin, North Hebei Province (this study))

**图 3.** 早、中 - 晚期热河生物群化石的埋藏环境对比(九佛堂组地层数据来自辽宁北部的秀水盆地[37], 义县组地层数据来自辽宁西部的义县盆地[29], 花吉营组地层数据来自河北省北部的四岔口盆地(本研究))

**Table 2.** Kruskal-Wallis analysis of indexes from the sediment that bearing different periods of the Jehol Biota  
**表 2.** 热河生物群不同时期埋藏地层的沉积物指标的 Kruskal-Wallis 分析

指标	花吉营组 vs. 九佛堂组	花吉营组 vs. 义县组	花吉营组 vs. (九佛堂组和义县组)
Sr	1	1	1
Rb	1	1	1
Co	—	1	—
Cr	1	0	1
V	1	1	1
Ba	1	1	1
Rb/Sr	1	1	1
Sr/Ba	1	1	1
V/Cr	1	1	1

注: 1) 数据来源同图 3。2) “1”表示 Kruskal-Wallis 检验拒绝零假设, 即这些厚度之间的指标显著不同,  $p < 0.05$ ; “0”表示 Kruskal-Wallis 检验保留零假设, 即这些厚度之间的指标没有显著差异,  $p > 0.05$ 。

## 6. 结论

本研究对早期热河生物群对化石赋存层位所在剖面的沉积物进行了微量元素分析, 并与已报道的中

- 晚期热河生物群赋存的义县组和九佛堂组地层的结果对比分析, 获得以下初步结论:

1) 元素 Sr、Sr/Ba 和 V/Cr 组合指示四岔口盆地花吉营组沉积时的水体整体为古盐度低的陆相淡水环境, 且古水体处于多次、快速的氧化 - 弱还原环境的波动状态。

2) 元素 Hg、S 组合指示四岔口盆地花吉营组沉积时存在显著的火山活动。S 含量与 V/Cr 比值的显著线性相关, 指示可能是火山的多次喷发导致了埋藏水体由氧化环境向弱还原环境的更替。

3) 元素 Sr、Co 和 Rb/Sr 组合指示早期热河生物群埋藏初期的气候比中 - 晚期更温暖湿润; Sr/Ba 和 V/Cr 组合对比指示早期热河生物群的埋藏水体比中 - 晚期的相对富氧。

## 基金项目

该研究由国家自然科学基金(42102007)和山东省大学生创新创业训练项目(S202210452012)资助。

## 参考文献

- [1] Pan, Y.H., Sha, J.G., Zhou, Z.H. and Fürsich, F.T. (2013) The Jehol Biota: Definition and Distribution of Exceptionally Preserved Relicts of a Continental Early Cretaceous Ecosystem. *Cretaceous Research*, **44**, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2013.03.007>
- [2] Zhou, Z.H., Wang, Y., Xu, X. and Ren, D. (2017) The Jehol Biota: An Exceptional Window into Early Cretaceous Terrestrial Ecosystems. In: Fraser, N.C. and Sues, H.D., Eds., *Terrestrial Conservation Lagerstätten: Windows into the Evolution of Life on Land*, Dunedin Academic Press, Edinburgh, 169-214. <https://doi.org/10.2307/jj.12638994.9>
- [3] 徐星, 周忠和, 王原, 王敏. 热河生物群研究的回顾与展望[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(10): 1491-1511.
- [4] Chang, M., Chen, P.J., Wan, G.Y., Wang, Y.Q. and Miao, D. (2003) The Jehol Biota: The Emergence of Feathered Dinosaurs, Beaked Birds, and Flowering Plants. Shanghai Scientific & Technical Publishers, Shanghai, 1-208.
- [5] Ji, Q., Chen, W., Wang, W.L., Jin, X.C., Zhang, J.P., Liu, Y.Q., Zhang, H., Yao, P.Y., Ji, S., Yuan, C.X., Zhang, Y. and You, H.L. (2004) Mesozoic Jehol Biota of Western Liaoning. Geological Publishing House, Beijing.
- [6] Wang, X.L. and Zhou, Z.H. (2008) Mesozoic Pompeii. In: Chang, M.M., Ed., *The Jehol Fossils*, Shanghai Scientific & Technical Publishers, Shanghai, 19-35. <https://doi.org/10.1016/B978-012374173-8.50003-X>
- [7] Zhou, Z.H., Barrett, P.M. and Hilton, J. (2003) An Exceptionally Preserved Lower Cretaceous Ecosystem. *Nature*, **421**, 807-814. <https://doi.org/10.1038/nature01420>
- [8] Zhou, Z.H. and Wang, Y. (2017) Vertebrate Assemblages of the Jurassic Yanliao Biota and the Early Cretaceous Jehol Biota: Comparisons and Implications. *Palaoworld*, **26**, 241-252. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2017.01.002>
- [9] Jiang, B.Y., Harlow, G.E., Wohletz, K., Zhou, Z. and Meng, J. (2014) New Evidence Suggests Pyroclastic Flows Are Responsible for the Remarkable Preservation of the Jehol Biota. *Nature Communications*, **5**, Article No. 3151. <https://doi.org/10.1038/ncomms4151>
- [10] Pan, Y., Sha, J. and Fürsich, F.T. (2012) Dynamics of the Lacustrine Fauna from the Early Cretaceous Yixian Formation, China: Implications of Volcanic and Climatic Factors. *Lethaia*, **45**, 299-314. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.2011.00284.x>
- [11] Zhou, Z.H. (2014) The Jehol Biota, an Early Cretaceous Terrestrial Lagerstätte: New Discoveries and Implications. *National Science Review*, **1**, 543-559. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwu055>
- [12] Guo, Z.F. and Wang, X.L. (2002) A Study on the Relationship between Volcanic Activities and Mass Mortalities of the Jehol Vertebrate Fauna from Sihetun, Western Liaoning, China. *Acta Petrologica Sinica*, **18**, 117-125.
- [13] Jiang, B.Y. and Sha, J.G. (2007) Preliminary Analysis of the Depositional Environments of the Lower Cretaceous Yixian Formation in the Sihetun Area, Western Liaoning, China. *Cretaceous Research*, **28**, 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2006.05.010>
- [14] Jiang, B.Y., Fürsich, F.T., Sha, J.G., Wang, B. and Niu, Y.Z. (2011) Early Cretaceous Volcanism and Its Impact on Fossil Preservation in Western Liaoning, NE China. *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **302**, 255-269. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.01.016>
- [15] 丁秋红, 金成洙, 张立东, 郭胜哲, 张长捷, 彭艳东, 贾斌, 陈树旺, 邢德和, 郑月娟. 四合屯含鸟化石层地球化学异常及沉积环境[J]. 地质与资源, 2003, 12(3): 139-145.
- [16] Wang, Y.Q., Olsen, P.E., Sha, J.G., Yao, X.G., Liao, H.Y., Pan, Y.H., Kinney, S., Zhang, X.L. and Rao, X. (2016) Stratigraphy, Correlation, Depositional Environments, and Cyclicity of the Early Cretaceous Yixian and Jurassic-Cretaceous



- Tuchengzi Formations in the Sihetun Area (NE China) Based on Three Continuous Cores. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **464**, 110-133. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.06.043>
- [17] Zhang, X.L., Zhng, G.J. and Sha, J.G. (2016) Lacustrine Sedimentary Record of Early Aptian Carbon Cycle Perturbation in Western Liaoning, China. *Cretaceous Research*, **62**, 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2015.10.001>
- [18] Zhang, F.C. and Zhou, Z.H. (2000) A Primitive Enantiornithine Bird and the Origin of Feathers. *Science*, **290**, 1955-1959. <https://doi.org/10.1126/science.290.5498.1955>
- [19] Jin, F., Zhang, F.C., Li, Z.H., Zhang, J.Y. and Zhou, Z.H. (2008) On the Horizon of Protopteryx and the Early Vertebrate Fossil Assemblages of the Jehol Biota. *Chinese Science Bulletin*, **53**, 2820-2827. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0209-5>
- [20] Wang, M., Zheng, X.T., O'Connor, J.K., Lloyd, G.T., Wang, X.L., Wang, Y., Zhang, X.M. and Zhou, Z.H. (2015) The Oldest Record of Ornithuromorpha from the Early Cretaceous of China. *Nature Communications*, **6**, Article No. 6987. <https://doi.org/10.1038/ncomms7987>
- [21] Zhang, F.C., Zhou, Z.H. and Benton, M.J. (2008) A Primitive Confuciusornithid Bird from China and Its Implications for Early Avian Flight. *Science in China Series D: Earth Science*, **51**, 625-639. <https://doi.org/10.1007/s11430-008-0050-3>
- [22] 李卫东, 刘霞. 东北山地沙地区和京津周围沙地平原区退耕还林区域模式研究[J]. 防护林科技, 2004(2): 1-6, 12.
- [23] Yang, J.H., Wu, F.Y., Shao, J.A., Wilde, S.A., Xie, L.W. and Liu, M. (2006) Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, **246**, 336-352. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.04.029>
- [24] 柳永清, 李佩贤, 田树刚. 冀北滦平晚中生代火山碎屑(熔)岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3): 237-244.
- [25] Yang, S.H., He, H.Y., Jin, F., Zhang, F.C., Wu, Y.B., Yu, Z.Q., Li, Q.L., Wang, M., O'Connor, J.K., Deng, C.L., Zhu, R.X. and Zhou, Z.H. (2020) The Appearance and Duration of the Jehol Biota: Constraint from SIMS U-Pb Zircon Dating for the Huajiyang Formation in Northern China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117**, 14299-14305. <https://doi.org/10.1073/pnas.1918272117>
- [26] 孙志超, 赵艳, 刘贺, 任晔营, 郭颖, 邵凤丽, 王金玲, 阎作均, 王朝民, 张福成. 冀北四岔口盆地早白垩世大型恐龙化石赋存地层的有机碳同位素记录及其古环境意义[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(6): 747-755.
- [27] Zhao, Y., Tian, Q., Ren, G.Y., Guo, Y. and Zheng, X.T. (2023) Taphonomic Analysis of the Exceptional Preservation of Early Bird Feathers during the Early Cretaceous Period in Northeast China. *Frontiers in Earth Sciences*, **10**, Article 1020594. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1020594>
- [28] 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 李元昊, 田景春, 李士祥, 尤靖茜. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1265-1273.
- [29] 梁俊红, 孙宝亮, 尹国英. 辽西早白垩世义县组砖城子层湖相碳酸盐岩地球化学特征及古湖泊学沉积意义[J]. 地质找矿论丛, 2021, 36(4): 475-485.
- [30] 李成凤, 肖继风. 用微量元素研究胜利油田东营盆地沙河街组的古盐度[J]. 沉积学报, 1988, 6(4): 100-107.
- [31] 范萌萌, 卜军, 赵筱艳, 康博, 李文厚, 张卫国. 鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义[J]. 西北大学学报, 2049, 49(4): 633-642.
- [32] 梁子若, 侯明才, 曹海洋, 昭晖. 内蒙古大青山石拐盆地侏罗系元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 成都理工大学学报, 2020, 47(3): 307-317.
- [33] Piper, D.Z. (1994) Sea Water as the Source of Minor Elements in Black Shales, Phosphorites and Other Sedimentary Rocks. *Chemical Geology*, **114**, 95-114. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90044-2)
- [34] Jones, B. and Manning, D.A.C. (1994) Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones. *Chemical Geology*, **111**, 111-129. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90085-X)
- [35] 陈树旺, 金成洙, 张允平, 张立东, 郭胜哲. 论辽西四合屯地区早白垩世构造-火山活动及生物事件[J]. 地球学报, 2005, 26(3): 241-248.
- [36] Amiot, R., Wang, X., Zhou, Z.H., Wang, X.L., Buffetaut, E., Lécuyer, C., Ding, Z.L., Fluteau, F., Hibino, T., Kusuhashi, N., Mo, J.Y., Suteethorn, V., Wang, Y.Q., Xu, X. and Zhang, F.S. (2011) Oxygen Isotopes of East Asian Dinosaurs Reveal Exceptionally Cold Early Cretaceous Climates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**, 5179-5183. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011369108>
- [37] 李文博, 李晓梅, 丁秋红, 陈述旺, 张健. 辽宁北部秀水盆地白垩系九佛堂组沉积岩地球化学特征及其古沉积环境[J]. 世界地质, 2019, 38(1), 154-161.
- [38] 陈骏, 汪永进, 陈旻, 刘连文, 季峻峰, 鹿化煜. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义[J]. 地

- 
- 质学报, 2001, 75(2): 259-266.
- [39] 叶荷, 张克信, 季军良, 梁美艳, 张键钰, 徐亚东, 陈奋宁. 青海循化盆地 23.1-5.0 Ma 沉积地层中常量、微量元素组成特征及其古气候演变[J]. 地球科学, 2010, 35(5): 811-820.
- [40] 金明, 李妩巍. 乌兰花地区下白垩统一上新统岩石地球化学特征及其古气候演变[J]. 铀矿地质, 2003, 19(6): 349-354.
- [41] Keller, G. (2008) Cretaceous Climate, Volcanism, Impacts, and Biotic Effects. *Cretaceous Research*, **29**, 754-771. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2008.05.030>